

# Schwerter zu Pflugscharen – Megatonnen zu Megawatt Brennstoff aus Sprengstoff

Dr. H.J. Wingender

Die folgenden Texte basieren zum Teil auf Übersetzungen von Veröffentlichungen der World Nuclear Association (WNA) und der US Enrichment Corporation (USEC) im Internet.

## **Brennstoff aus Sprengstoff**

- **Begriffe und Grundlagen**
- **Vereinbarungen und Ziele**
- **Verfahren und Transporte**
- **Verlauf und Status quo**

## ***Begriffe und Grundlagen***

**Waffen-Uran** ist „hoch angereichertes Uran“ (highly enriched uranium = HEU) mit einem Anteil von über 90 % (Gewichtsprozent) des spaltbaren Isotops U-235. Waffen-Uran wird aus Natururan in speziellen Anreicherungsanlagen hergestellt, die so ausgelegt sind, dass trotz der hohen Spaltstoffkonzentrationen keine Kettenreaktionen – also Kritikalität - eintreten können. Unter „Kritikalität von Spaltstoffsystemen“ versteht man die Eigenschaft, unter gewissen Voraussetzungen sich selbst aufrecht erhaltende Abfolgen von Spaltungsreaktionen - eben Kettenreaktionen – einzuleiten. Zur Verhinderung von Kritikalität dienen primär drei Maßnahmen, nämlich die Beschränkung der Spaltstoffmasse in den Apparaturen unter die sogenannte kritische Masse, die Beschränkung der Abmessungen der Apparaturen unter die sogenannten kritischen Dimensionen und die Beschränkung der Spaltstoffkonzentration unter den Wert der kritischen Konzentration; letztere Maßnahme ist natürlich bei der Anreicherung zu Waffen-Uran nicht anwendbar, da hier gerade höchste Konzentrationen erzielt werden sollen. Zweitens gibt es sekundäre Maßnahmen wie z. B. Materialauswahl und geometrische Gestaltung der Apparaturen und deren Umgebung zur Vermeidung von Moderation der Neutronenenergien und von Rückstreuung/Reflexion von Neutronen zurück in die Apparaturen sowie die Verwendung von sogenannten Neutronengiften, das sind Materialien, die Neutronen abfangen, so dass sie für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion nicht zur Verfügung stehen.

Die Anreicherungsverfahren benötigen große Mengen an elektrischer Energie und werden meist von Kernkraftwerken versorgt. Um aus Waffen-Uran (HEU) Reaktorbrennstoff mit einem Anreicherungsgrad von zwischen 3 und 6 % U-235 herzustellen – niedrig angereichertes Uran (lowly enriched uranium = LEU) – muss HEU zum Beispiel mit Natururan (0,72 % U-235) vermischt werden (**Details siehe Abschnitt Verfahren und Transporte**). Der so hergestellte Brennstoff wird in kommerziellen Kernkraftwerken ebenso verwendet wie der übliche LEU-Brennstoff aus angereichertem Natururan.

## Materialdaten zu Natur-Uran

| Natur-Uran |                                  |            |                              |                             |
|------------|----------------------------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| Isotope    | Anteil in %<br>(Gewichtsprozent) | Spaltstoff | Halbwertszeit<br>HWZ (Jahre) | Sonstiges                   |
| U-233      | 0, nicht in Natur-Uran vorhanden | Ja         | 159 200                      | Aus Thorium 232 hergestellt |
| U-234      | 0.0055                           | Nein       | 245 500                      |                             |
| U-235      | 0.72                             | Ja         | 703 000 000                  | 703 Millionen Jahre         |
| U-238      | 99.2745                          | Nein       | 4 468 000 000                | 4,5 Milliarden Jahre        |

**Waffen-Plutonium** enthält mehr als 93 % (Gewichtsprozent) des spaltbaren Isotops Pu-239. Waffen-Plutonium wird aus den Brennelementen speziell dafür ausgelegter und betriebener Reaktoren gewonnen. Das Plutonium wird in einem chemischen Verfahren (Wiederaufarbeitung) aus dem Stoffgemisch der dem Reaktor entnommenen Brennelemente chemisch abgetrennt und gereinigt. Ein spezieller Anreicherungsprozess für Waffen-Plutonium ist also nicht erforderlich. Der Reinheitsgrad wird physikalisch durch die Betriebsweise des Reaktors und chemisch durch die Art der anschließenden Abtrennung und Reinigung erreicht. Dieses Plutonium kann durch Mischung mit Natururan zu einem Reaktorbrandstoff mit ähnlichen Eigenschaften wie LEU umgewandelt werden. Da es sich dabei um eine Mischung von Uranoxid ( $UO_2$ ) und Plutoniumoxid ( $PuO_2$ ) handelt, wird die Kurzbezeichnung MOX (von Mischoxid) dafür verwendet (Details siehe Abschnitt Verfahren und Transporte).

MOX-Brennelemente sind jedoch nicht die einzige Form von Plutonium-Brennstoff. Ganz normale Uranbrennelemente mit LEU erzeugen beim Reaktorbetrieb aus U-238, das zu über 90% im Brennstoff vorhanden ist, durch Neutroneneinfang den Spaltstoff Pu-239 in nicht unerheblicher Menge. Ein Teil dieses Materials wird während des Betriebs gespalten. Plutonium ist also in ganz normalen Kernkraftwerken ein Energierohstoff für die Stromerzeugung.

Dazu als Beispiel:

Ein normalerweise für vier Jahre im Reaktor verwendetes Uran-Brennelement, das anfänglich 3,2 % (also 32 kg U-235/tSM und 968 kg U-238/tSM) angereichertes Uran enthält (tSM = Tonne Schwermetall, also hier Tonne Uran, „Schwermetall“ ist hier identisch mit Uran) und bis zu einem Abbrand von 36 GWd/tSM (Gigawatt-Tage pro Tonne Schwermetall) ausgenutzt wird, enthält schließlich ca. 38 kg Spaltprodukte und an spaltbarem Material noch ca. 7 kg U-235 und 19 kg Pu-239. Es sind also 25 kg U-235 (32 kg – 7 kg = 25 kg U-235) gespalten worden. Weiterhin sind auch noch 13 kg Pu239 gespalten worden; damit ergibt sich die Menge der Spaltprodukte. Daraus folgt für dieses Beispiel, dass rund ein Drittel der Energieumwandlung und der Stromerzeugung im Kernkraftwerk auch bei anfänglich reinem Uranbrandstoff vom Plutonium stammen. Das Beispiel zeigt auch, dass man nicht „leichten Herzens und leichter Hände“ und mit vorschnellem Entschluss auf die noch im Brennstoff verbliebenen 26 kg/tSM spaltbaren Materials (7 kg U-235 und 19 kg Pu-239) verzichten sollte – das sind immerhin noch 1 kg mehr als die verbrauchte Menge an U-235.

Es gibt kein „Natur-Plutonium“ mehr auf der Erde. Plutonium wird in den Prozessen der Sternzusammenbrüche (Supernovae) gebildet und als Staub in den Weltraum verteilt. Bis aber aus diesen Stäuben ein Sonnensystem mit Planeten gebildet wird, sind auch die langlebigsten Plutoniumisotope infolge ihrer Radioaktivität vollständig verschwunden. Auf der Erde hat es allerdings vor einigen (ca. 2) Milliarden Jahren natürliche Kernreaktoren gegeben, in denen auch Plutonium erzeugt und gespalten wurde; doch auch davon ist heutzutage fast alles verschwunden.

## Materialdaten zu Plutonium

(wie es in Brennelementen von zivilen Kernkraftwerken in signifikanten Mengen gebildet wird. Das gilt nicht für militärische Reaktoren zur Erzeugung von Waffen-Plutonium)

| Plutonium im Reaktor |                |            |             |             |
|----------------------|----------------|------------|-------------|-------------|
| Pu-Isotope           | Anteil ca. (%) | Spaltstoff | HWZ (Jahre) | Sonstiges   |
| Pu 238               | 2              | Nein       | 87,7        |             |
| Pu 239               | 63             | Ja         | 24 110      |             |
| Pu 240               | 21             | Nein       | 6 563       |             |
| Pu 241               | 11             | Ja         | 14,35       |             |
| Pu 242               | 3              | Nein       | 375 000     |             |
| höhere               | < 1            |            |             | unbedeutend |

Hier sollte man fragen, wie es möglich ist, ohne Anreicherung einen Anteil von über 93% Pu-239 zu erzielen, wenn der Reaktor nur ca. 60% Anteil liefert. Das hängt an einigen kernphysikalischen Eigenschaften, die dafür sorgen, dass der Anteil sehr viel höher ist, wenn die Brennelemente nicht über vier Jahre aufgebraucht werden wie in einem normalen Kraftwerksreaktor, sondern bereits nach wenigen Wochen entnommen und nach einer angemessenen Abkühlphase wiederaufgearbeitet werden, um das Waffen-Plutonium chemisch abzutrennen. Der Betrieb von Kernkraftwerken liefert also kein Bombenplutonium; dazu werden spezielle militärische Reaktor-anlagen eingesetzt.

Die Erzeugung des Brennstoffes bzw. Bombenstoffes Pu-239 erfolgt im Reaktor. Der Ausgangsstoff ist U-238. Im Neutronenfluss der Spaltungsreaktionen werden immer wieder auch vom U-238 Neutronen eingefangen und so U-239-Kerne erzeugt, die sehr bald (HWZ ist 23,5 Minuten) durch Emission eines negativ geladenen Elektrons ( $\beta$ -Zerfall) in Kerne des Neptunium 239 (Np-239) übergehen. Diese zerfallen ebenfalls relativ schnell (HWZ ist 2,355 Tage) durch  $\beta$ -Zerfall in den Kern Pu-239 – den neuen Brennstoffkern.

### Erzeugung von Pu-239

|                          |                        |                                       |  |
|--------------------------|------------------------|---------------------------------------|--|
| Ausgangsstoffe           | U-238<br>Neutronen (n) | HWZ von U-238<br>4,5 Milliarden Jahre | HWZ von n<br>Ca.13 Minuten                       |
| Reaktion                 | Neutroneneinfang       |                                       |  |
| Zwischenprodukt I        | U-239                  | HWZ von U-239<br>23,5 Minuten         | $\beta$ -Zerfall,<br>Emission eines<br>Elektrons |
| Zwischenprodukt II       | Neptunium Np 239       | HWZ von Np-239<br>2,4 Tage            | $\beta$ -Zerfall,<br>Emission eines<br>Elektrons |
| Endprodukt<br>Spaltstoff | Plutonium Pu-239       | HWZ von Pu-239<br>ca. 24 000 Jahre    | $\alpha$ -Zerfall,<br>Emission eines<br>He-Kerns |

Eine ähnliche Brennstoff-Erzeugung wird mithilfe der Umwandlung von Thorium-232 in Uran-233 durchgeführt. Das Element Thorium (Th) hat nur ein natürliches Isotop, nämlich Th-232 mit einer HWZ von 14,05 Milliarden Jahren – noch nicht ganz so lange wie das Alter des Universums. Vermischt man Thoriumoxid z. B. mit Plutoniumoxid oder mit Uranoxid - etwa wie in einem Mischoxidbrennstoff aus Uranoxid und Plutoniumoxid – derart, dass etwa 5 Gewichtsprozent spaltbares Material in der Mischung enthalten sind, so wird in diesem Material beim Betrieb im Reaktor aus Th-232 der neue spaltbare Stoff U-233 erzeugt.

### Erzeugung von U-233

|                          |                                 |                                       |  |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|
| Ausgangsstoffe           | Thorium Th-232<br>Neutronen (n) | HWZ von Th-232<br>14 Milliarden Jahre | HWZ von n<br>Ca.13 Minuten                       |
| Reaktion                 | Neutroneneinfang                |                                       |  |
| Zwischenprodukt I        | Th-233                          | HWZ von Th-233<br>22,3 Minuten        | $\beta$ -Zerfall,<br>Emission eines<br>Elektrons |
| Zwischenprodukt II       | Protactinium Pa-233             | HWZ von Pa-233<br>27 Tage             | $\beta$ -Zerfall,<br>Emission eines<br>Elektrons |
| Endprodukt<br>Spaltstoff | Uran U-233                      | HWZ von U-233<br>ca. 159 000 Jahre    | $\alpha$ -Zerfall,<br>Emission eines<br>He-Kerns |

Offensichtlich werden bei all diesen Umwandlungen aus extrem langlebigen Ausgangsstoffen schließlich spaltbare Stoffe gebildet, deren Lebensdauern/Halbwertszeiten erheblich kürzer als die der Ausgangsstoffe sind. Der Prozess wird in der gleichen Richtung fortgesetzt, wenn die spaltbaren Stoffe gespalten und zu Spaltprodukten werden, deren HWZ im Bereich von ca. 100 Jahren und darunter liegen. Dieses Phänomen kann unter dem Aspekt der Endlagerung der radioaktiven Abfälle bedeutsam werden und entlarvt die immer wieder erhobene Behauptung, durch den Betrieb von Spaltungsreaktoren würden äußerst langlebige Nuklide erzeugt, als unzutreffend.

## **Vereinbarungen und Ziele**

Seit mehr als drei Jahrzehnten konzentrieren sich die Bedenkllichkeiten darauf, dass Uran-Brennstoff oder Plutonium aus der kommerziellen Nutzung abgezweigt und zu nuklearem Sprengstoff umgewandelt werden könnten. Neuerdings dagegen richtet sich die Aufmerksamkeit auf Verfahren, mit denen Brennstoffe für Kraftwerke aus atomaren Sprengstoffen hergestellt werden.

Die Mengen an **Waffen-Uran** und **Waffen-Plutonium**, die über den militärischen Bedarf der Vereinigten Staaten von Amerika (USA) und der Russischen Föderation (RF) hinausgehen, werden zur Verwendung als ziviler Brennstoff in kommerziellen Kernkraftwerken bereitgestellt. Die Angaben zu den Beständen an waffenfähigem Nuklearmaterial in den Arsenalen der USA und der RF lauten (ohne Berücksichtigung der Entnahmen für die hier geschilderten Abrüstungsmaßnahmen):

- HEU ca. 2000 Tonnen entsprechend zwölf heutigen Jahresproduktionen an Natururan und
- Pu etwa 260 Tonnen, als Brennstoffreserve etwa äquivalent der Menge einer heutigen Jahresproduktion an Natururan.

Vertragliche Vereinbarungen zur Umwandlung zu zivilem Reaktor-brennstoff (LEU und MOX) betreffen davon zur Zeit:

- in der Russischen Föderation 500 Tonnen HEU und 34 Tonnen Pu,
- in den USA 174 Tonnen HEU unterschiedlicher Anreicherungsstufen (> 20% U-235 bis 93% U-235) und ebenfalls 34 Tonnen Pu.

## **Uran**

Die Menge an HEU, die aus dem militärischen Bereich entnommen und der zivilen Elektrizitätserzeugung zugeführt wird, entspricht etwa 9000 Tonnen Natur-Uran pro Jahr oder ca. 13% des Gesamtbedarfs der Reaktoren der Erde (ca. 70 000 Tonnen Natur-Uran) in jedem Jahr des Zeitraums, in dem dieses Programm abgearbeitet wird – also von 1993 bis 2013. Es wird sehr darauf zu achten sein, dass der Wegfall dieser Versorgungsquelle für Brennstoff durch Bevorratung, Gewinnung und eventuelle Fortführung des Programms in verkleinertem Maße ausgeglichen wird.

Seit 1987 haben die Vereinigten Staaten von Amerika und die Länder der früheren Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken in einer Reihe von Abrüstungsverträgen vereinbart, ihre Kernwaffenarsenale um etwa 80% zu verringern. Als überflüssig deklarierte Mengen von Kernwaffenmaterial werden gegenwärtig in Brennstoff für Kernkraftwerke umgewandelt. In der Hauptsache handelt es sich dabei um HEU, ein Material das mindestens 20% U-235 (Brennstoff für Forschungsreaktoren), üblicherweise jedoch mehr als 90% U-235 enthält. Beim Umwandlungsverfahren wird dieses HEU mit Uran vermischt, das nur sehr geringe Anteile an U-235 enthält, wodurch schließlich ein Material gebildet wird mit einem U-235-Anteil von üblicherweise 3 bis 6%, sogenanntes LEU, das als Brennstoff für Kraftwerke verwendet wird. Die Stoffe, mit denen HEU zur Erzeugung von LEU vermischt wird, sind das Nebenprodukt der Urananreicherungsprozesse, nämlich abgereichertes Uran mit weniger als 0,5% U-235, Natururan mit 0,72% U-235 oder teilweise angereichertes Uran mit etwa 1 bis 2% U-235. Die restlichen Anteile, mit denen sich die Prozentsätze zu 100% ergänzen, sind in allen Fällen jeweils U-238 sowie

geringfügige Mengen anderer Uranisotope. Die Menge an HEU in den Beständen der USA und der RF beträgt etwa 2000 Tonnen und entspricht ungefähr dem Zwölfwachen der heutigen jährlichen Natururanproduktion weltweit und dem Inventar von etwa 80 000 Kernwaffen

Die gegenseitige vertragliche Verpflichtung der USA und der RF zur Umwandlung von Kernwaffen in Brennstoff für Kraftwerke wird auch als Programm Megatonnen zu Megawatt bezeichnet. Die beiden Staaten vereinbarten 1993, dass Russland 500 Tonnen HEU aus Gefechtsköpfen und militärischen Lagerbeständen, entsprechend etwa 20.000 Atombomben zu je ca. 25 kg nuklearem Sprengstoff (HEU), in LEU umwandelt, das von den USA zur Verwendung als Brennstoff in zivilen Kernkraftwerken gekauft wird. Der Kaufpreis sollte der damals sehr daniederliegenden russischen Wirtschaft aufhelfen. Als Bevollmächtigte der beiden Regierungen in dieser Angelegenheit schlossen die Firmen USEC (US Enrichment Corporation) und Tenex (Technabexport) einen Vertrag im Wert von 12 Milliarden US\$, aufgrund dessen USEC ein Minimum von 500 Tonnen waffenfähiges HEU über 20 Jahre bis zum Jahr 2013 von Tenex erwirbt, und zwar in Raten von bis zu 30 Tonnen pro Jahr beginnend 1999. Der scheinbare rechnerische Fehlbetrag erklärt sich durch den langsameren Beginn in den Jahren 1994 bis 1999.

HEU verarbeitet (t, kumuliert)

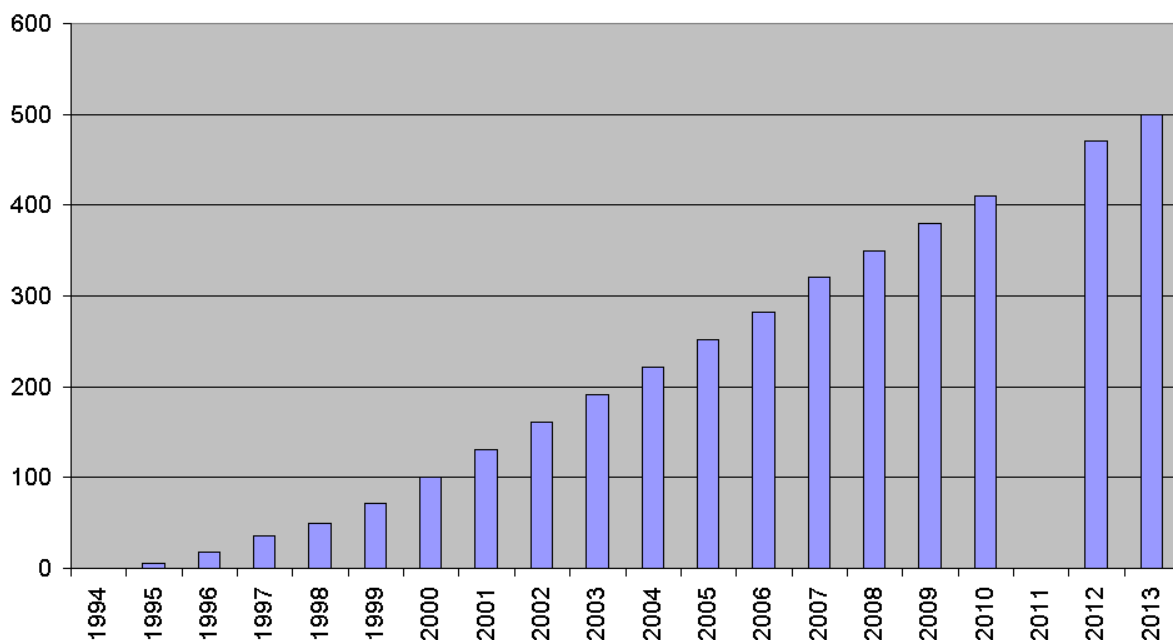


Abbildung 1: Fortschritte bei der Umwandlung von HEU – Fakten bis 2009, Prognose ab 2010

Das HEU wird in Russland zu 15 259 Tonnen LEU – äquivalent zu 137 000 Tonnen Natururan - gemischt, so dass eine Endanreicherung von 4,4% U-235 erzielt wird. Dazu wird Uran mit 1,5% U-235 verwendet, das aus abgereicherten Uran – dem Nebenprodukt des normalen Uran-Anreicherungsprozesses – durch Wiederanreicherung gewonnen wird. Die Gründe für diese etwas umständlich anmutende Vorgehensweise liegen in den Anteilen der Uranisotope 234 und 236, deren Konzentrationen wegen Qualitätsforderungen der Reaktorbetreiber innerhalb vorgegebener Grenzen bleiben müssen.

Die von der Regierung der USA für die zivile Nutzung deklarierten 174 Tonnen an HEU werden in unregelmäßigen Zeitabständen chargenweise zur Umwandlung in

Reaktorbrennstoff freigegeben. Dazu werden jeweils Verträge mit Verarbeitungsunternehmen in den USA geschlossen. Ein Teil des Brennstoffs soll direkt zu Brennelementen verarbeitet werden; ein anderer Teil wird als internationale Brennstoffreserve in einem sog. „Reliable Fuel Supply Program“ dienen. Der größte Teil des militärischen HEU wird vermutlich nur auf 20% U-235 herunter gemischt und so gelagert, da es in dieser Konzentration nicht waffenfähig nutzbar aber als Brennstoff für Forschungsreaktoren und solchen Reaktoren geeignet ist, die zur Erzeugung von radioaktiven Substanzen zur medizinischen und technischen Verwendung dienen oder z. B. auch in Messgeräten wie Proportionalzählern zur Neutronenflussmessung.

Bis zum 23. September 2009 waren 375 Tonnen HEU zu 10.868 Tonnen LEU verarbeitet worden – entsprechend 15 000 Gefechtsköpfen.

## **Plutonium**

Der heutige Gesamtvorrat an Waffen-Plutonium soll sich auf ungefähr 260 Tonnen belaufen. Vermischt zu MOX für die Verwendung in Kernkraftwerken entspräche dieses Material einer Jahresproduktion von Uranbrennstoff aus ca. 70 000 Tonnen Natur-Uran (siehe auch: atw 5, 2008). Etwa 150 Tonnen von diesem Plutonium könnten sich als für militärische Zwecke entbehrlich erweisen. 1994 jedoch wurde zwischen den USA und der RF vereinbart, dass zunächst jeder von ihnen 34 Tonnen Waffen-Plutonium bis 2014 vernichtet. Diese Plutoniummenge beider Staaten ist etwa äquivalent der Brennstoffmenge in 12 000 Tonnen Natur-Uran.

Ursprünglich (1994) planten die USA zwei Wege für die Beseitigung des Plutoniums:

- Immobilisierung zusammen mit hochradioaktivem Abfall – das Plutonium wird nicht als Wertstoff sondern als Abfall behandelt und zusammen mit den Spaltprodukten in eine Glas- oder Steinmatrix eingebunden. Diese Kombination ist so aktiv, dass sie nicht zu Zwecken der illegalen Plutonium-Rückgewinnung heimlich abgezweigt werden kann.
- Verwendung in MOX-Brennstoff für kommerzielle Reaktoren – wobei der MOX-Brennstoff so gemischt sein sollte, dass Pu-239 nicht in für militärische Anwendungen hinreichender Reinheit daraus extrahiert werden kann.

Der zweite Weg wurde schließlich als Lösung favorisiert und für die Hauptmenge des Plutoniums ausgewählt. Im August 2007 wurde in North Carolina auf dem Gelände des Savannah-River Zentrums des Department of Energy (DOE) mit dem Bau einer Fabrikationsanlage für MOX-Brennstoff begonnen, die nach gegenwärtigen Planungsvorstellungen den Betrieb im Jahr 2016 aufnehmen wird. Für Bau und Betrieb werden die französischen Erfahrungen durch Einbindung der Firma AREVA genutzt. In der Anlage werden etwa 1700 MOX-Brennelemente aus abgereichertem Uran und mindestens 34 Tonnen Waffen-Plutonium gefertigt werden, das aus fast reinem Pu-239 besteht, während das normale „Reaktor-Plutonium“ etwa ein Drittel nicht spaltbarer Plutonium-Isotope enthält und somit ein etwas andersartiges MOX ergibt. In Vorbereitung und zu Testzwecken wurden im Jahre 2005 vier MOX-Brennelemente aus 140 kg US-Waffenplutonium in einem Kraftwerk in South Carolina (Duke Power's Catawba-1) eingesetzt. Das Plutonium war in Cadarache in Frankreich zu zwei Tonnen MOX Brennstofftabletten und diese dann in der Melox Anlage zu Brennelementen verarbeitet worden.

Inzwischen ist das meiste Plutonium nach Savannah River geliefert. Man geht davon aus, dass aus 15 Tonnen Waffenplutonium – entsprechend etwa 3000 Gefechtsköpfen – Brennstoff zur Produktion von 110 TWh (TWh Terawattstunde = 1 Milliarde kWh) elektrischen Stroms hergestellt werden können.

Russland hat vor, das Plutonium als Brennstoff für seine Brutreaktoren („Schnelle Brüter“) BN-600, BN-800 und später BREST in Beloyarsk zu verwenden. Die ursprünglich von den USA erhobene Forderung, auch das russische Plutonium für MOX-Brennstoff für Leichtwasserreaktoren zu verwenden, wurde fallen gelassen, als sich die Global Nuclear Energy Partnership im Jahre 2006 etablierte und die Entwicklung der Brütertechnologie wieder aufgenommen wurde. Die Anlagen zur Herstellung der Brennelemente für die russischen Brutreaktoren sind vorhanden. Der Einsatz des Plutoniums im BN-600 soll 2012 beginnen. Der BN-800 wird zur Zeit errichtet. Beide Reaktoren zusammen sollen etwa 1.5 Tonnen Waffen-Plutonium jährlich verbrennen können.

Eine weitere Variante zur Beseitigung von Waffen-Plutonium ist die Entwicklung von Brennstoff, der auf Thorium und Plutonium basiert und aus Th-232 U-233 als neuen Brennstoff liefert. Die Arbeiten dazu werden am Kurtchatov Institut in Moskau unter Beteiligung der US Firma Thorium Power durchgeführt. Der U-233-Brennstoff soll dann in normalen Leichtwasserreaktoren, z. B. VVER 1000 (eine russ. Reaktorbau-reihe, die Red.), als Brennstoff genutzt werden.

Th-Pu-MOX soll gegenüber herkömmlichem U-Pu-MOX mindestens vier Vorteile haben:

- Völlige Proliferationssicherheit,
- Kompatibilität mit den existierenden Reaktoren (Uran auch hier der Brennstoff),
- der Brennstoff kann in existierenden Anlagen hergestellt werden,
- schließlich kann wesentlich mehr Pu in einem Th-Pu-Brennelement als in einem U-Pu-Brennelement untergebracht werden.

Die Zusammensetzung und die Mengen des Abfalls aus der Aufarbeitung der abgebrannten Brennelemente dürften recht interessant sein im Vergleich zu MOX-Abfällen.

Außer den vier Testelementen in den USA sind noch keine MOX-Brennelemente aus Waffen-Plutonium in Reaktoren eingesetzt worden. Die Arbeiten in Russland sollen 2012 und in den USA nach 2016 beginnen.

## ***Verfahren und Transporte***

### **Uran**

Das **russische** HEU wird in mehreren Prozessschritten in Russland konvertiert und zu LEU verdünnt, das für die Herstellung von Brennstoff für kommerzielle Kernkraftwerksreaktoren geeignet ist. Dieses LEU wird nach den USA transportiert und dort zu Brennstoff und Brennelementen verarbeitet und zur Stromerzeugung eingesetzt.

Im Jahre 2013 werden 500 Tonnen HEU umgewandelt und 20 000 Gefechtsköpfe eliminiert sein. Es wird gelegentlich darauf hingewiesen, dass dieser Vorgang die einzige Abrüstungsaktion ist, die nicht nur nichts kostet sondern sogar Gewinn bringt. Das ist sicher richtig - bis auf den Betrag, der zuvor in die Herstellung von HEU und

Gefechtsköpfen investiert wurde. Auf jeden Fall ist die Angelegenheit eine positiv zu beurteilende Maßnahme für den Frieden auf Erden.

Die **Umwandlung/Konversion** von HEU zu LEU beginnt mit der mechanischen Demontage der Gefechtsköpfe von taktischen und strategischen Lenkwaffen und deren metallischen HEU-Inventaren.

**Oxidation:** In der Anlage der Siberian Chemical Enterprises (SChE, früher Tomsk 7) in Seversk und in der Mayak Production Association (MPA) in der Nähe von Ozersk werden die aus metallischem HEU bestehenden Teile mechanisch zu Spänen zerlegt. Anschließend werden die Späne aufgeheizt und zu HEU-Oxid konvertiert, wobei auch eventuell vorhandene Verunreinigungen entfernt werden.

**Fluoridbildung:** In den Anlagen der SChE und der Electrochemical Plant (ECP bei Krasnoyarsk) wird das Uranoxid ( $\text{UO}_2$ ) in Uranhexafluorid ( $\text{UF}_6$ ) umgewandelt. Diese Verbindung ist bei Normaltemperatur ein Feststoff, wird aber bereits bei leicht erhöhter Temperatur gasförmig.

**Verdünnung:** In den Anlagen der SChE, ECP und der Urals Electrochemical Integrated Plant (UEIP) bei Yekaterinenburg wird das HEU- $\text{UF}_6$  als Gas in einen Prozessstrom eingeschleust, wo es mit ebenfalls gasförmigem  $\text{UF}_6$  aus abgereichertem Uran so vermischt wird, dass ein LEU- $\text{UF}_6$  mit einer U-235-Konzentration von 5% entsteht, gerade richtig für die LEU-Brennstoffe.

**Transportbehälter:** Abschließend wird überprüft, ob das Produkt den handelsüblichen Spezifikationen für die Fertigung von Reaktorbrennstoff entspricht. Das fertige Produkt wird in die genormten, genehmigten zylinderförmigen Stahlbehälter für den Transport von  $\text{UF}_6$  abgefüllt.

**Transport nach Sankt Petersburg und USA:** Die Transportbehälter mit LEU werden zu einem Sammelpunkt in Sankt Petersburg gebracht und dort in das Eigentum von USEC überführt. Der weitere Transport in die USA erfolgt in der Verantwortung von USEC per Schiff. Die erste Lieferung erreichte die USA im März 1994.

**Bearbeitung bei USEC:** Nach einer Eingangsprüfung hinsichtlich der vertraglichen Spezifikationen und eventuell davon abweichender Endkundenanforderungen erfolgt die Freigabe zur Weiterverarbeitung – eventuell nach einer immer möglichen Anpassung des Anreicherungs-niveaus.

**Transport zu den Brennelementherstellern und Kunden:** USEC transportiert das  $\text{UF}_6$  zu den Brennelementherstellern (Global Nuclear Fuels, Framatome oder Westinghouse). Dort wird das Material in Oxid ( $\text{UO}_2$ ) umgewandelt, zu Tabletten geformt, gesintert und in Hüllrohre gefüllt, die zu Brennelementen angeordnet werden. Die Elemente werden schließlich zu den Kernreaktoren der USEC-Kunden geliefert.

Alle oben genannten Schritte unterliegen ständiger und eingehender Überprüfungen durch die National Nuclear Security Administration (NNSA) hinsichtlich der materialtechnischen Spezifikationen und der Nichtverbreitungsziele.

Da die beteiligten Partner Kernwaffenstaaten sind, ist die Internationale Atomenergiebehörde (International Atomic Energy Agency IAEA) in Wien in die Überwachung nicht involviert.

Das **HEU aus den Beständen der USA** wird in den USA nach den gleichen Schritten wie oben geschildert be- und verarbeitet. Dazu hat die National Nuclear Security Administration Verträge mit den Firmen Nuclear Fuel Services und Wesdyne

International geschlossen, die über die erforderlichen Anlagen und Einrichtungen verfügen. Das  $UF_6$  wird bei der Westinghouse Brennelementefabrik in South Carolina gelagert und für das Reliable Fuel Supply Programm verfügbar gehalten.

## **Plutonium**

Die jeweils 34 Tonnen Waffen-Plutonium werden in den beiden Ländern gemäß den etwas unterschiedlichen Zielsetzungen, nämlich Brennstoff für Brutreaktoren (U/Pu-Brüter und Th/U-Brüter) in Russland und MOX-Brennstoff für kommerzielle Leichtwasser-Reaktoren (LWR) in den USA, auch in etwas verschiedener Weise verarbeitet. Die Basis dürfte jedoch gleich sein. Zur Verfügung stehen das ausgereifte nass-chemische Verfahren des PUREX-Prozesses, der auch der Wiederaufarbeitung zugrunde liegt, und die trockene Oxidbildung, wie beim HEU praktiziert, allerdings ohne den Schritt der Fluoridbildung.

Das PUREX-Verfahren hat die Nachteile, als nicht proliferationssicher zu gelten und möglicherweise wegen der extremen Spaltstoffkonzentration hinsichtlich der Kritikalitätssicherheit Probleme aufzuweisen. Da andererseits die weitere Verfolgung der Brütertechnologie eine Wiederaufarbeitung wie auch immer erfordert, wird wohl die **RF** zumindest anfangs bestimmte Stufen des PUREX-Prozesses verwenden und abwarten, welche anderen Verfahren andernorts im Rahmen des Vorhabens der Global Nuclear Energy Partnership favorisiert werden. Die **USA** haben bisher Test-Brennelemente in Frankreich herstellen lassen und den Standort der MOX-Fabrikationsanlage in Savannah-River festgelegt. Das lässt auch hier eine anfängliche Präferenz für die Mischung von in Salpetersäure gelösten Uran- und Plutoniumkomponenten vermuten. Eine Wiederaufarbeitung der abgebrannten MOX-Brennelemente ist nicht vorgesehen, da die USA strikt gegen die Wiederaufarbeitung von mit Waffenmaterial hergestelltem Kernbrennstoff sind und seit der Carter-Administration generell die Wiederaufarbeitung im Leichtwasserreaktor-Brennstoffkreislauf ablehnen. Somit ergibt sich für diese MOX-Brennstoffe keine weitere Zukunftsanwendung – es sei denn, dass auch die USA sich den neuen nuklearen Techniken verstärkt zuwenden, wie sich z. B. aus den Arbeiten zum Thoriumreaktor zusammen mit dem Kurtchatov Institut in Moskau absehen lässt.

Die im HEU-Projekt verwendete Oxidierung der Komponenten kann auch für MOX praktiziert werden. Natur-Uran oder abgereichertes Uran liegt in den meisten Fällen als Hexafluorid vor und kann in existierenden Anlagen genauso oxidiert werden wie der normale angereicherte Reaktorbrennstoff. Die Plutoniumoxidbildung wird ebenso vorgenommen wie die Bildung von HEU-Oxid. Beide Oxide werden zu Pulver verarbeitet und dann im gewünschten Verhältnis zu MOX gemischt. Die Brennelementherstellung mit MOX erfolgt ebenso wie die mit LEU.

## ***Verlauf und Status quo***

### **HEU**

Die Vernichtung von 20 000 nuklearen Gefechtsköpfen mit 500 Tonnen Waffen-Uran verläuft planmäßig. Ende September 2009 waren 15 000 Gefechtsköpfe eliminiert. Diese Menge entspricht 375 Tonnen HEU, die mit Natururan vermischt ca. 10 900 Tonnen LEU ergeben. Probleme sind nicht erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass das Ziel termingerecht Ende 2013 erreicht werden wird.

Um einen Anhaltswert für das mit 500 Tonnen HEU verfügbare und nutzbare Energieäquivalent zu vermitteln, wird angegeben, dass mit dem daraus gewonnenen Reaktorbrennstoff die Stadt Seattle 767 Jahre lang mit Strom versorgt werden könnte, die USA 2 Jahre lang und unser Globus 4 Monate lang. Andere Brennstoffe mit demselben Energiepotenzial wären 2.9 Milliarden Tonnen Steinkohle oder 10.3 Milliarden Barrel (=1.6 Milliarden m<sup>3</sup>) Erdöl oder 2850 Milliarden m<sup>3</sup> Erdgas. Dafür zahlen die USA 12 Milliarden US\$ an Russland – und wenden noch einiges Geld im eigenen Land für die Brennelementherstellung auf – man erkennt also ein Kostenäquivalent von 1 bis 2 US\$ pro Barrel Erdöl. Natürlich ist das paradiesische Bild erst dann vollständig, wenn man die Kosten für die Herstellung und die Unterhaltung der Kernwaffen sowie die Mengen an bisher noch unberührtem Kernwaffenmaterial ebenfalls in Ansatz bringt.

### **Plutonium**

Das Projekt zur Vernichtung von Gefechtsköpfen mit Waffen-Plutonium hat sich aus verschiedenen Gründen verzögert, zeigt aber jetzt nach Überwindung von politischen und finanziellen Problemen alle Anzeichen einer guten Entwicklung mit Angabe von zeitlich und technisch fixierten Meilensteinen. Obwohl nur eine gegenüber dem HEU-Projekt vergleichsweise geringe Menge an Spaltstoff vernichtet werden soll, nämlich 68 Tonnen Waffen-Plutonium oder ca. 13 % der HEU-Menge, sind auch damit erhebliche Potenziale für die Stromversorgung in Russland und den USA verbunden.

**Der abgebrannte Brennstoff von LEU- oder MOX-Brennelementen ist zur Kernwaffenherstellung ungeeignet.**